平谱射电类星体 3C 454.3 中长周期有效谱指数特性研究

吴月承[1]，龚云露[2]，封涛涛[1]
(1.泉州信息工程学院通识教育中心 泉州 362000)
(2.云南大学物理与天文学院 云南 昆明 650500)

摘要： 耀变体是一种非常活跃的活动星系核，研究它的有效谱指数是认识其内部结构和辐射机制的有效方法。文中数据采用目前已公布出的 SMARTS 数据库数据，共 682 组具有 B,V,R,J,K 波段的准同时性的观测数据，用 LombScargle Periodogram（LSP）方法研究了其有效谱指数的特性，结果得出 3C 454.3 光学和红外波段光变之间呈正相关；光学和红外波段光变存在 2 个主导周期，分别约为 1.2yr，4.5yr；双黑洞结构模型中双黑洞质量比为2/1。

关键词： 耀变体，3C 454.3，相关性，LSP 方法

中图分类号： P157 **文献标识码：** A

一、 引言

平谱射电类星体 3C 454.3(PKS J2253+1608)，红移 z=0.859，几乎在所有的电磁波段都有着活跃的光变。光学波段的短时标光变特性揭示出 3C 454.3 具有越亮越红的观测现象[1]，存在 7.18 分钟、34.91 分钟和 68.92 分钟的短时标光变[2]，有着复杂的短时标光变机制。光学、红外、射电波段有着剧烈的中长周期光变[3]，甚至伽马波段存在约 47 天主导的周期光变[4]。γ波

---

[1]作者简介：吴月承，男，助教，研究方向：活动星系核. Email：chwuyc@163.com

段的辐射由外康普顿过程所导致[5]。3C 454.3 可能存在超大质量双星黑洞（SMBBM）[6]，文[7]用洛伦兹因子$\gamma = 5$计算出双黑洞结构的生命周期约$5 \times 10^4 yr$。文[8]研究 3C 454.3 光学 R 波段长达 12 年的长周期光变得出其可能具有（3.04±0.02yr），（1.66±0.06yr）和（1.20±0.03yr）的三个光变周期。伽马波段、紫外波段、光学波段和红外波段光变是同步的，来源于同一个区域，而 X 射线波段光变滞后光学波段 98 天[9,10]。这表明该天体有着特殊的内部结构和辐射机理，文中通过研究 3C 454.3 的光学和红外波段有效谱指数特性来探究其辐射特性。

二、 观测

Small and Medium Aperture Research Telescope System（SMARTS）数据库目前已公布 3C 454.3 光学和红外自 2008 年 6 月到 2017 年 8 月的光学 B,V,R 波段和红外 J,K 波段的观测数据。SMARTS 基于 1.3m 口径光学望远镜观测 3C 454.3，采用 CCD 方法处理照片。本文从 SMARTS 数据库和文[3]中收集了 3C 454.3 自 2008 年 6 月到 2017 年 8 月的光学 B,V,R 波段和红外 J,K 波段的光变数据，光变曲线如图 1 所示。每天观测 5 个波段的数据为一组，同组数据观测时间都在同一天，具有准同时性；这 5 个波段中各具有数据点 682 个，共有 3410 个数据。在 2016 年 6 月 19 日 20 时 15 分到 2016 年 6 月 19 日 20 时 25 分之间采样间隔最小约 10 分钟；在 2015 年 11 月 30 日 12 时 50 分到 2016 年 6 月 8 日 20 时 54 分之间采样间隔最大约 191.34 天；对数据间隔取平均得出平均采样间隔约 4.85 天。数据观测时间长达十年，具有采样多、观测密集等特性。

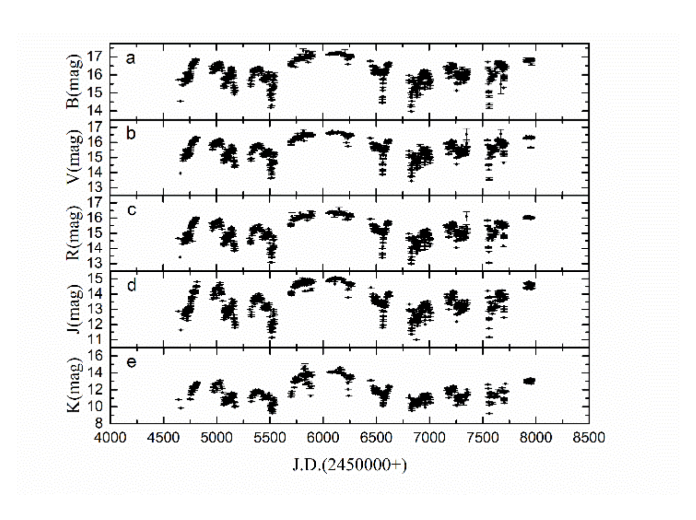


图 1 K, J, R, V, B 波段的光变曲线

Fig.1 Light curve in K, J, R, V, B bands

三、 3C 454.3 有效谱指数特性分析

一般谱指数指某个频率和其流量之间的指数关系，有效谱指数指两个不同波段之间流量和频率的关系，通常用于研究辐射光谱特性和各个波段间光变的相关性，我们定义频率ν_i和频率ν_j的有效谱指数为[11, 12, 13]：

$$\alpha_{i,j} = -\frac{\log(\frac{F_i}{F_j})}{\log(\frac{\nu_i}{\nu_j})} \quad (1)$$

式（1）中F_i和F_j分别是频率ν_i和频率ν_j相对应的流量。文中计算了 5 个波段之间的有效谱指数，并通过线性回归方程拟合出各个有效谱指数之间的相关性，拟合结果见表 1。

如表 1 所示，线性回归中将x视为自变量并假设关系$y = A + Bx$；σ是标准差，r是相关系数，p是置信概率。有效谱指数相关性最好的一组是$\alpha_{K,R}$-$\alpha_{R,B}$，相关系数$r = 0.62$，置信概率$p < 10^{-4}$，表现出强相关，$\alpha_{K,R} - \alpha_{R,B}$相关拟合见图 2。$\alpha_{K,V} - \alpha_{V,B}$的相关系数$r = 0.22$，置信概率$p < 10^{-4}$，无明显相关性；$\alpha_{K,J} - \alpha_{J,B}$的相关系数$r = 0.51$，置信概率$p < 10^{-4}$，存在弱相关性；$\alpha_{K,J}$-$\alpha_{J,V}$的相关系数$r = 0.51$，置信概率$p < 10^{-4}$，存在弱相关性；$\alpha_{K,J}$-$\alpha_{J,R}$的相关系数$r = 0.47$，置信概率$p < 10^{-4}$，存在弱相关性；$\alpha_{K,J}$-$\alpha_{J,R}$的相关系数$r = 0.47$，置信概率$p < 10^{-4}$，存在弱相关性；$\alpha_{K,R}$-$\alpha_{R,V}$的相关系

数$r=0.54$，置信概率$p<10^{-4}$，存在弱相关性。

表 1 线性回归分析结果

Table 1 The results of linear regression analysis

x	y	A(σ)	B(σ)	r	p	correlation
$\alpha_{K,J}$	$\alpha_{J,B}$	1.80±0.04	0.24±0.01	0.51	$<10^{-4}$	weak
$\alpha_{K,J}$	$\alpha_{J,V}$	1.73±0.05	0.27±0.02	0.51	$<10^{-4}$	weak
$\alpha_{K,J}$	$\alpha_{J,R}$	2.12±0.06	0.27±0.02	0.47	$<10^{-4}$	weak
$\alpha_{K,R}$	$\alpha_{R,B}$	0.96±0.05	0.36±0.02	0.62	$<10^{-4}$	strong
$\alpha_{K,R}$	$\alpha_{R,V}$	0.25±0.08	0.29±0.03	0.54	$<10^{-4}$	weak
$\alpha_{K,V}$	$\alpha_{V,B}$	1.82±0.09	0.20±0.03	0.22	$<10^{-4}$	none

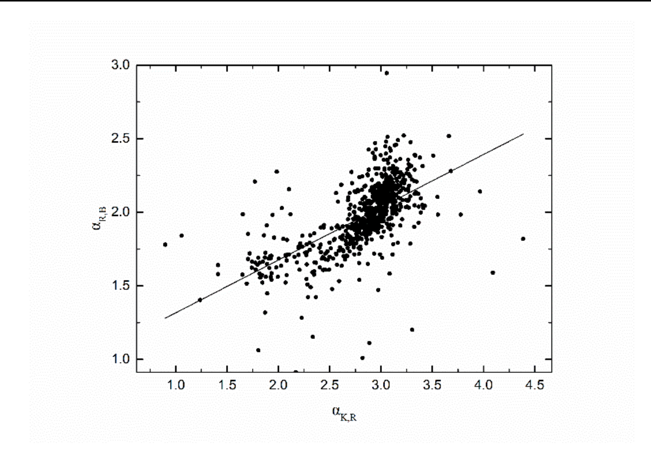
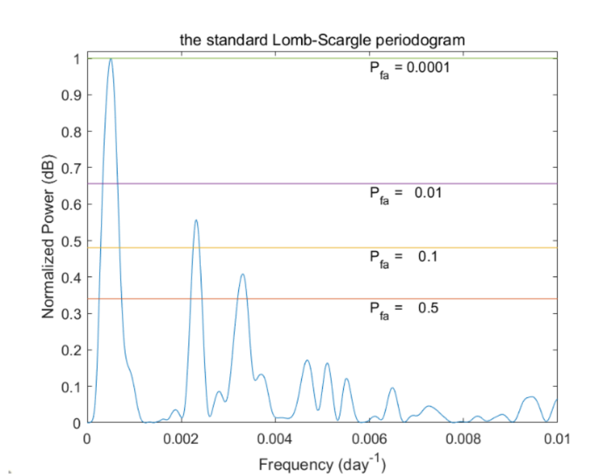


图 2 $\alpha_{K,R}$ 和 $\alpha_{R,B}$的相关性

Fig.2 Correlation between $\alpha_{K,R}$ and $\alpha_{R,B}$

非均匀时间序列周期信号可以采用 Lomb-Scargle periodogram（LSP）[14]方法分析信号中含有的周期。文中用 LSP 方法研究 3C 454.3 光学 B 波段和红外 J 波段的有效谱指数变化周期，并用虚警概率检验其置信度，区分噪声信号。

谱指数$\alpha_{K,J}$周期图见图 3，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为



$2.32\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[386-491]天，1.20±0.15 年。峰值频率为$5.00\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

图 3 谱指数$\alpha_{K,J}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.3 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{K,J}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{K,R}$周期图见图 4，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.30\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[388-501]天，1.21±0.16 年。峰值频率为$5.34\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

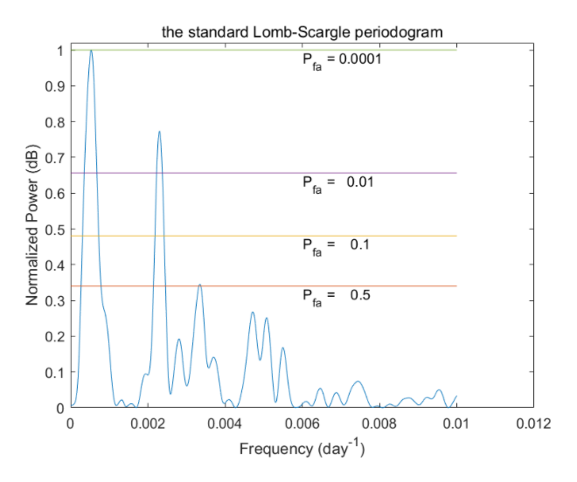


图 4 谱指数$\alpha_{K,R}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.4 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{K,R}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{K,V}$周期图见图 5，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.29\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[388-499]天，1.21±0.15 年。峰值频率为$5.48\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

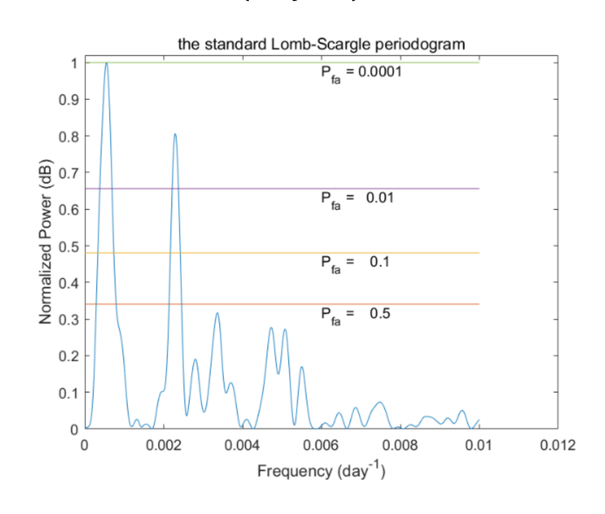


图 5 谱指数$\alpha_{K,V}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.5 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{K,V}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{K,B}$周期图见图 6，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.29\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[389-500]天，1.21±0.15 年。峰值频率为$5.56\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

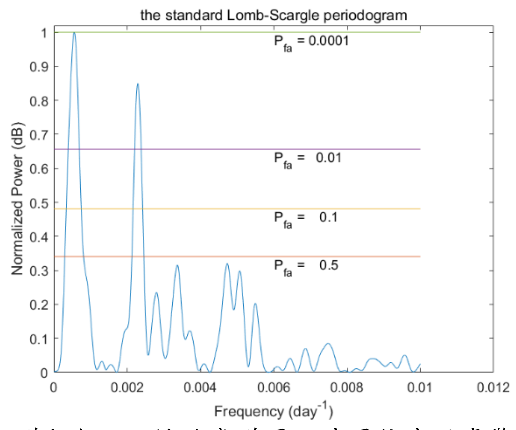


图 6 谱指数$\alpha_{K,B}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.6 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{K,B}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{J,R}$周期图见图 7，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.26\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[390-577]天，1.32±0.26 年。峰值频率为$6.01\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

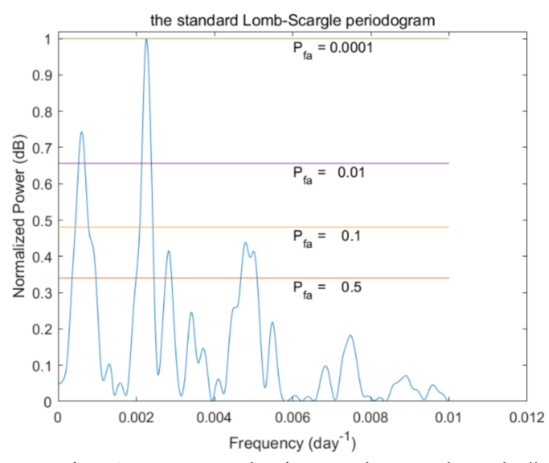


图 7 谱指数$\alpha_{J,R}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.7 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{J,R}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{J,V}$周期图见图 8，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.26\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[391-577]天，1.32±0.26 年。峰值频率为$6.01\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

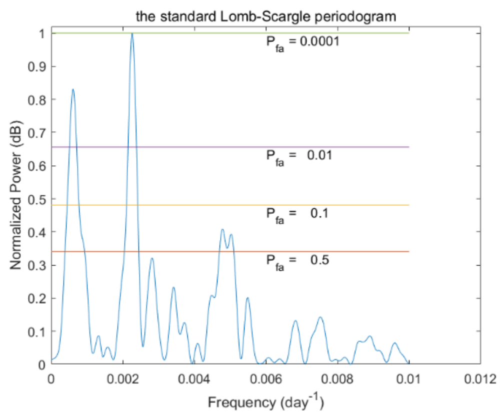


图 8 谱指数$\alpha_{J,V}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.8 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{J,V}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{J,B}$周期图见图 9，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.25\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[392-571]天，1.31±0.24 年。峰值频率为$6.25\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰缺少拐点，不作考虑。

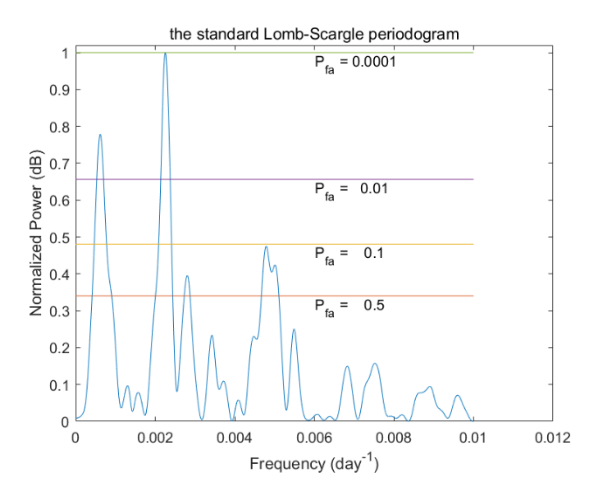


图 9 谱指数$\alpha_{J,B}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.9 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{J,B}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{R,V}$周期图见图 10，其中功率为归一化功率，峰值频率为$6.10\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[852-4630]天，7.65±5.30 年。得出了峰值频率为$2.23\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[392-576]天，1.32±0.25 年。

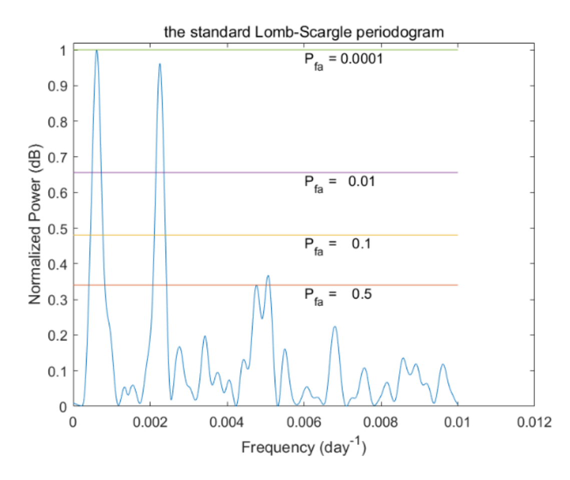


图 10 谱指数$\alpha_{R,V}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.10 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{R,V}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{R,B}$周期图见图 11，其中功率为归一化功率，峰值频率为$6.29\times10^{-4}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[889-3882]天，6.54±4.10 年。得出了峰值频率为$2.23\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[396-567]天，1.32±0.24 年。得出了峰值频率为$4.80\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，得到周期[202-222]天。

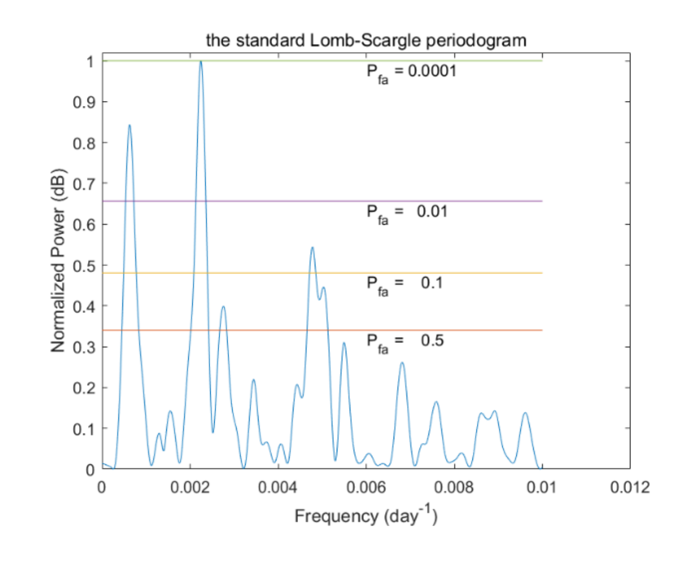


图 11 谱指数$\alpha_{R,B}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.11 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{R,B}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

谱指数$\alpha_{V,B}$周期图见图 12，其中功率为归一化功率，得出了峰值频率为$2.22\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[411-556]天，1.32±0.20 年。得出了峰值频率为$2.75\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[304-411]天。得出了峰值频率为$4.82\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[191-220]天。得出了峰值频率为$5.48\times10^{-3}(day^{-1})$的显著峰，按拐点计算，得到周期[167-191]天。

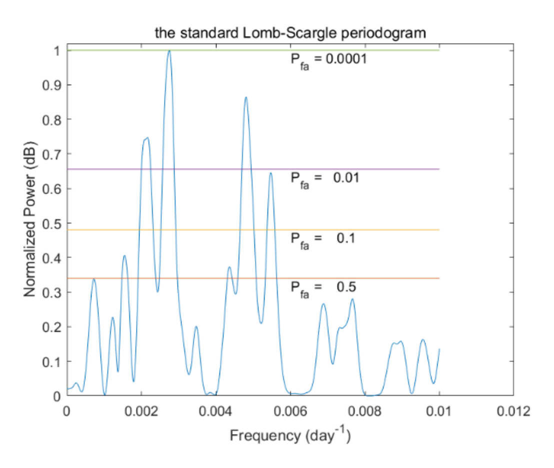


图 12 谱指数$\alpha_{V,B}$的功率谱图，其置信度用虚警概率表示

Fig.12 The power spectrum of the spectral index $\alpha_{V,B}$ and its confidence using the false-alarm probabilities

四、 讨论

根据式（1）表述，若频率$\nu_i<\nu_j$，分母$\log(\nu_i)-\log(\nu_j)$是固定值，分子$\log(F_i)-\log(F_j)$增大时会导致有效谱指数$\alpha_{i,j}$增大，有效谱指数$\alpha_{i,j}$增大意味着流量F_i光变比F_j更为剧烈。有效谱指数$\alpha_{J,B}$增大意味着 3C 454. 3 在光学和红外发生光变，并且说明红外波段光变比光学波段更为剧烈，谱指数$\alpha_{J,B}$变化周期为光变周期。假设有效谱指数相关性为$\alpha_{A,B}$-$\alpha_{B,C}$，且频率$\nu_A<\nu_B<\nu_C$，若为正相关，意味着$\log(F_A),\log(F_B)$和$\log(F_C)$的流量变化具

有同增或同减的特性。

根据表 1 中线性拟合结果得知$\alpha_{K,R}$-$\alpha_{R,B}$、$\alpha_{K,J}-\alpha_{J,B}$、$\alpha_{K,J}$-$\alpha_{J,R}$、$\alpha_{K,J}$-$\alpha_{J,R}$及$\alpha_{K,R}$-$\alpha_{R,V}$均有正相关性，其中$\alpha_{K,R}$-$\alpha_{R,B}$相关性最好，这意味着当$k$波段流量增大时，$R$波段和$B$波段流量也增大，光学和红外波段的光变流量呈正相关。

$\alpha_{K,V}-\alpha_{V,B}$无明显相关性，分析其原因为 V 波段与 B 波段的亮度非常接近，测量过程中存在一定误差导致。

3C 454.3 功率谱图中峰值频率分析得出 3C 454.3 光学和红外有效谱指数存在一个约 1.2 年的主导周期和一个约 4.5 年的主导周期。3C 454.3 的两个主导周期现象的原因可能归结为双黑洞模型。

根据 Rieger 在 2007 年给出的观测准周期P_{obs}与实际物理驱动周期P_{source}之间的关系公式为：

$$P_{source} = \frac{P_{obs} \cdot \gamma^2}{1+z} \quad (2)$$

其中$z = 0.859$，γ 是洛伦兹因子等于 5。基于（2）式可以得到实际物理驱动周期$P_{source\,1}$ ≈16yr，$P_{source\,2}$ ≈61yr。

Volvach 在 2021 年给出双黑洞模型中黑洞质量和周期之间关系公式：

$$\frac{M+m}{m} = 0.75\frac{T_{pr}}{T_{orb}} \quad (3)$$

其中$T_{pr} = P_{source\,2} = 61yr$，$T_{orb} = P_{source\,1} = 16yr$。

由（3）式变换后得到双黑洞质量比和周期比的关系式：

$$\frac{M}{m} = 0.75\frac{T_{pr}}{T_{orb}} - 1 \quad (4)$$

基于(4)式得到 3C 454.3 的双黑洞质量比$\frac{M}{m} \approx 2$。

五、 结论

首次采用有效谱指数来分析 3C 454.3 的光变特性，得到了以下结果：

（1）从光学和红外波段的有效谱指数分析得出了 3C 454.3 光学和红外波段光变之间呈正相关关系。

（2）3C 454.3 存在 2 个主导周期，分别约为 1.2yr，4.5yr。

（3）双黑洞模型中得出 3C 454.3 的双黑洞质量比为$\frac{2}{1}$。

参考文献

[1] Fan J H, Yuan Y H, Wu H, et al. Simultaneous optical g, r, i monitoring and IDV periodic analysis for quasar 3C 454.3[J]. Research in Astronomy and Astrophysics,2019,19(10):45-52.

[2] Yuan Y H，Wang G G，Xiao H B，et al. Optical Monitoring and Variability Analyses of the FSRQ 3C 454.3[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series,2022,262(2):43.

[3] 吴月承,张皓晶,余莲,等.平谱射电类星体 3C 454.3 的中长周期光变特性研究[J].天文研究与技术,2020,17(01):1-7.

Wu Y C, Zhang H J, Yu L, et al. The Medium and Long Period Light Variation Characteristics of FSRQ 3C 454. 3[J]. Astronomy Research and Technology,2020,17(01):1-7.

[4] Sarkar A, Gupta A C, Chitnis V R, et al. Multiwaveband quasi-periodic oscillation in the blazar 3C 454.3[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,2021,501:50-61.

[5] Fan X L, Li S K, Liao N H, et al. Optical and Gamma-Ray Variability Behaviors of 3C 454.3 from 2006 to 2011[J]. The Astrophysical Journal,2018,856(1):80-88.

[6] Qian S J, Britzen S, Krichbaum T P, et al. Possible evidence for a supermassive binary black hole in 3C454.3[J]. Astronomy & Astrophysics,2021,653:A7.

[7] Volvach A E, Volvach L N, Larionov M G.Most massive double black hole 3C 454.3 and powerful gravitational wave radiation[J]. Astronomy & Astrophysics,2021,648:A27.

[8] Fan J H, Kurtanidze S O, Liu Y, et al. Optical Photometry of the Quasar 3C 454.3 during the Period 2006-2018 and the Long-term Periodicity Analysis[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series,2021,253(1):10.

[9] Zhou B, Dai B Z, Yang J P. Long-term multiband correlation study and spectral energy distribution modeling of blazar 3C 454.3[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan,2021,73(4):850–863.

[10] Sarkar A, Chitnis V R, Gupta A C, et al. Long-term Variability and Correlation Study of the Blazar 3C 454.3 in the Radio, NIR, and Optical Wavebands[J]. The Astrophysical Journal,2019,887:185.

[11] 唐玲，张皓晶，郑永刚，等.γ 噪 Blazar 天体的复合谱指数研究[J].天文研究与技术,2008,5(04):337-348.

Tang L, Zhang H J, Zheng Y G, et al. A Study of the Broad-band Spectral Indeices of Gamma-ray-loud Blazars[J]. Astronomy Research and Technology,2008,5(04):337-348.

[12] 聂建军,陈怡,樊军辉,等.Blazar 多波段有效谱指数关系研究[J].天文学报,2020,61(01):79-112.

Nie J J, Chen Y, Fan J H, et al. The Relations of Effective Spectral Indices of Multi-wavebands for Fermi Blazars[J]. Acta Astronomica Sinica,2020,61(01):79-112.
[13] Zheng Y G, Zhang X, Hu S M. The broad band spectral index of blazars in a low state[J]. Astrophysics and Space Science,2007,310(1-2):1-12.
[14] Horne J H, Baliunas S L. A Prescription for Period Analysis of Unevenly Sampled Time Series[J]. Astrophysical Journal,1986,302:757-763.

The medium and long period Broad band spectral index Characteristics of Flat Spectrum Radio Quasar 3C 454.3

Wu Yuecheng[1], Gong Yunlu[2], Feng Taotao[1]
(1.General Education Center, Quanzhou University of Information Engineering, Quanzhou 362000)
(2. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500)

Abstract: Blazar is a very active AGN. Studying its broad band spectral index is the effective method to understand its internal structure and radiation mechanism. The data in this paper adopts the SMARTS database data that has been published so far. There are 682 groups of observation data with quasi-simultaneity in B, V, R, J, K bands. The characteristics of its broad band spectral index are studied using LombScargle Periodogram (LSP) method. The results show that 3C 454.3 optical and infrared band light variations are positively correlated; There are two dominant periods in optical and infrared band, which are about 1.2 yr and 4.5 yr, respectively; In the double black hole structure model, the mass ratio of double black holes is 2/1.

Key words: Blazars; 3C 454.3; Correlation; LSP Method